

## ارزیابی پارامترهای مختلف شبیه سازی عملکرد حرارتی و سیالاتی نمای دوپوسته جعبه‌ای تهویه طبیعی با نرم افزار فلوئنت

**چکیده:** مکانیزم عملکرد نمای دوپوسته با تهویه طبیعی بر اساس رفتار حرارتی و جریان هوا در حفره میانی می باشد. دینامیک سیالات محاسباتی می تواند باعث ارتقا عملکرد این نماها گردد. هدف این مقاله، بررسی انواع گزینه های مربوط به مدل آشفتگی و مدل تابش نرم افزار فلوئنت و پارامتر های هندسی شامل دو بعدی یا سه بعدی بودن مدل هندسی شبیه سازی شده، مقیاس مدل سه بعدی و ابعاد مش بندی، برای شبیه سازی عملکرد حرارتی نمای دوپوسته جعبه ای با تهویه طبیعی با نرم افزار فلوئنت با هدف ارتقا دقت نتایج و دستیابی به کمترین زمان محاسبات کامپیوتری بود. نتایج نشان داد، مدل آشفتگی  $RNG\ k-\epsilon$ ، مدل تابشی DO و مدل هندسی سه بعدی دقیق ترین نتایج را خواهند داشت. در مش بندی با ابعاد ۸ میلیمتر و مقیاس ۳۳٪ نمونه سه بعدی واقعی، استقلال نتایج شبیه سازی از ابعاد شبکه و هندسه مدل شده حاصل گردید. شبیه سازی با هندسه مدل شده با مقیاس ۳۳٪ نمونه سه بعدی واقعی نسبت به هندسه سه بعدی واقعی منجر به نتایج مشابهی از نظر دقت گردید که در نهایت کاهش زمان محاسبات کامپیوتری شبیه سازی نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی با هندسه مقیاس شده ۳۳٪ نمونه واقعی به حدود یک سوم، نسبت به زمان محاسبات کامپیوتری شبیه سازی هندسه سه بعدی واقعی با حفظ دقت نتایج حاصل گردید.

**واژه های راهنما:** نمای دوپوسته جعبه‌ای، شبیه سازی، دینامیک سیالاتی محاسباتی، مدل آشفتگی، مدل تابشی

### فربال سادات سیادتی

دانشجوی دکتری، دانشکده هنر و معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

### ریمای فیاض\*

دانشیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر، تهران

### نیلوفر نیک قدم

استادیار، دانشکده هنر و معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۱

**Faryal Sadat Siadati**  
PhD Student, Faculty of Art and Architecture, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran

**Rima Fayaz\***  
Associate Professor, Faculty of Architecture and Urbanism, University of Art, Tehran

**Niloofar Nikghadam**  
Assistant Professor, Faculty of Art and Architecture, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran

## Evaluation of various thermal and fluid simulation parameters of performance of NVDSF with Fluent software

**Abstract:** The mechanism of operation of the double skin facade with natural ventilation (NVDSF) is based on the thermal behavior and air flow in the middle cavity. Computational fluid dynamics can improve the performance of these views. The purpose of this paper is to investigate various options related to turbulence and radiation model of Fluent software and geometric features including two-dimensional or three-dimensional simulated geometric model, scaled three-dimensional model and mesh dimensions, to simulate the thermal performance of the façade with Fluent software with the aim of improving the accuracy of the results and achieving the shortest computer computation time. The results show that the RNG k-ε turbulence model, the DO radiation model and the 3D geometric model will have the most accurate results. In mesh with dimensions of 8 mm and a scale of 33% of the real three-dimensional sample, the simulation results were independent of the mesh dimensions and scaled geometry. Simulations geometry with a scale of 33% of real 3D samples compared to real 3D geometry led to similar results in terms of accuracy. Finally, the reduction of computer computation time simulation of NVDSF with scaled geometry of 33% of the real sample to about one third was achieved by maintaining the accuracy of the results.

**Keywords:** box window double skin façade, simulation, Computational Fluid Dynamics, Turbulence Model, Radiation Model

## ۱- مقدمه

سازی دینامیک سیالات در حفره میانی نمای دوپوسته نیاز به درجه بالایی از دقت برای دستیابی به نتایج معتبر را دارد و تنها با نوع خاصی از مدل سازی عددی (دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱۱</sup> یا چند منطقه ای<sup>۱۲</sup>) امکان پذیر است. با این حال، بسته به هدف کلی فعالیت مدل سازی، رویکردهای متفاوتی برای مدل سازی پدیده ها در نمای دوپوسته با درجه دقت متفاوتی وجود دارد. این رویکردها را می توان در سه دسته طبقه بندی کرد که بر اساس ترتیب پیچیدگی مدل حفره هوا، بدین صورت طبقه بندی می شوند: (۱) مدل‌های ساده شده<sup>۱۳</sup>، (۲) مدل‌های منطقه ای و (۳) مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی<sup>[۷]</sup>.

مدل‌های ساده شده دقت کمی در نتایج دارند و زیرمجموعه های محدودی را پوشش می دهند، مانند: مدل‌های تحلیلی و یکپارچه<sup>۱۴</sup>، شبکه جریان هوا و کنترل حجم<sup>۱۵</sup> و مدل‌های حاصل از تجزیه و تحلیل غیر بعدی<sup>۱۶</sup> [۸]. مدل‌های ساده شده می توانند عملکرد حرارتی نمای دوپوسته را با شبیه سازی انتقال گرما و جرم پیش بینی کنند، اما نمی توانند دینامیک سیالات (انتقال حرکت) را شبیه سازی کنند. پرکاربردترین نوع مدل های ساده شده مدل های یکپارچه هستند که معمولاً برای تجزیه و تحلیل بهینه سازی پارامتری، نمایش ویژگی های کلی حرارتی سیستم های نمای دوپوسته و پیش بینی عملکرد انرژی آنها به عنوان یک ابزار کمک طراحی استفاده می شوند [۹]. مدل‌های ساده شده معمولاً تک بعدی هستند و دمای ثابتی را در سطوح و حفره میانی نما فرض می کنند [۱۰].

مدل‌های منطقه‌ای نمایش‌های پیشرفته‌تری نسبت به مدل‌های ساده شده دارند و در واقع یک روش با دقت و هزینه محاسباتی متوسط بین مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی و مدل‌های ساده شده را ارائه می دهند [۱۱]. مدل‌های منطقه ای، سیستم نمای دوپوسته را به سلول‌هایی بزرگتر از سلول‌های مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی تقسیم می کنند [۹].

در شبیه سازی با دینامیک سیالات محاسباتی، یک سیستم نمای دوپوسته به تعدادی سلول تقسیم می شود که برای هر سلول بایستی حداقل سه معادله بقا جرم، مومنتوم و انرژی برقرار شود. معادلات دیفرانسیل جزئی نشان دهنده این اصول بقا

نمای دوپوسته<sup>۱</sup> متشکل از دو لایه شیشه ای و یک لایه هوا بین آنها در حفره میانی<sup>۲</sup> نما می باشد. هوا در حفره میانی نمای دوپوسته به سه روش طبیعی<sup>۳</sup>، مکانیکی<sup>۴</sup> و هیبریدی<sup>۵</sup> تهویه می شود. سایه بانها<sup>۶</sup> برای کنترل تابش خورشید معمولاً در حفره میانی نمای دوپوسته نصب شده و باعث کاهش جذب انرژی از طریق تابش خورشید در فصول گرم سال و افزایش سرعت جریان هوا در حفره میانی به سبب تاثیرات شناوری<sup>۷</sup> می شوند [۱]. برای افزایش صرفه جویی در مصرف انرژی نمای دوپوسته، عملکرد صحیح نما ضروری است. لیکن عملکرد صحیح، مستلزم طراحی صحیح، مخصوصاً برای نمای دوپوسته با تهویه طبیعی می باشد که در آن فرایند حرارتی نمای دو پوسته و جریان هوا در حفره بر یکدیگر تاثیر می گذارند. اندازه بزرگی این تاثیر متقابل، وابسته به هندسه و ویژگی‌های حرارتی و اپتیکی<sup>۸</sup> اجزای نمای دوپوسته می‌باشد [۲].

برای بررسی عملکرد حرارتی نمای دوپوسته دو روش تحقیق مطالعات آزمایشگاهی (تجربی) و آنالیز عددی وجود دارد. مطالعات آزمایشگاهی اولین و معتبرترین منبع اطلاعات است. از طرف دیگر مطالعات آزمایشگاهی تنها راه اعتبارسنجی<sup>۹</sup> روش های عددی می باشند [۳]. مطالعات تجربی را می توان بسته به امکان کنترل محیط اطراف، به دو حالت طبیعی و کنترل شده تقسیم کرد. در آزمایشات طبیعی، مدل نمای دوپوسته (در مقیاس کامل) در معرض یک محیط گذرا واقعی بیرونی (نمای ساختمان) قرار می گیرد، در حالی که در آزمایش های کنترل شده، شرایط محیط بیرونی در محیطی آزمایشگاهی تکرار می شود [۴، ۵، ۶]. معمولاً در این نوع آزمایشات، تجزیه و تحلیل پارامتریک در شرایط پایدار و با تغییر پارامترهایی مانند خواص مصالح، عمق حفره یا زاویه سایه بان نمای دوپوسته یا شرایط مرزی (شدت تابش یا دمای محیط) انجام می شود.

مدل سازی عددی دقیق نماهای دوپوسته که بتواند پیچیدگی کامل این سیستم را حل کند، مستلزم نمایش ترکیبی از انتقال حرارت، جرم و مومنتوم<sup>۱۰</sup> است [۵]. مدلسازی و شبیه

<sup>10</sup> Momentum<sup>11</sup> Computational fluid dynamics<sup>12</sup> Multi-Zonal<sup>13</sup> Simplified Model<sup>14</sup> Analytical and Lumped<sup>15</sup> Control Volume<sup>16</sup> Non-Dimensional Analysis<sup>1</sup> Double skin facade<sup>2</sup> Cavity<sup>3</sup> Naturally<sup>4</sup> Mechanically<sup>5</sup> Hybrid<sup>6</sup> Slats<sup>7</sup> Buoyancy<sup>8</sup> Optical<sup>9</sup> Verification

ترین متغیرهای مستقل در طراحی نمای دوپوسته با تهویه طبیعی هستند (شکل ۱) [۳]. بنابراین برای یک طراحی مناسب با استفاده از نرم افزار شبیه سازی فلونت، صدها سناریوی شبیه سازی مورد نیاز است تا حالات مختلف متغیرهای مستقل را در برگیرد، ضمن آنکه اطمینان در دقت نتایج حاصل شده از شبیه سازی بسیار حائز اهمیت است. در نرم افزار فلونت برای هر شبیه سازی نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی، معمولا بین ۴۵۰۰ تا ۷۵۰۰ تکرار<sup>۸</sup> برای همگرایی نیاز است. هر تکرار برای شبیه سازی مدل سه بعدی. ابعادی با ابعاد مش ۸ میلیمتر، با کامپیوتر شخصی هفت هسته، ۲/۶ GHz CPU و ۱۶ GB حافظه، حدود ده ثانیه زمان می برد. بنابراین برای طراحی نمای دوپوسته، صدها ساعت زمان محاسباتی کامپیوتری لازم است.

بدین ترتیب هدف از این پژوهش، ارزیابی پارامترهای مختلف شبیه سازی عملکرد حرارتی و سیالاتی نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی با نرم افزار فلونت بوده به طوری که نتایج حاصل شده از شبیه سازی با نرم افزار دارای دقت کافی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی باشد و با حفظ دقت و استقلال نتایج از ابعاد مش و مشخصات هندسی مدل شبیه سازی، مدت زمان لازم برای شبیه سازی به حداقل ممکن برسد. بدین ترتیب با توجه به آنکه انتخاب درست مدل آشفتگی و تابشی، انتخاب هندسه مدل شبیه سازی شده و ابعاد مش بر دقت نتایج حاصل از شبیه سازی بسیار موثر بوده، لذا در این پژوهش، نتایج حاصل شده از شبیه سازی یک نمونه مشخص نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی با نرم افزار فلونت و با در نظر گرفتن ۲ مدل آشفتگی جریان RNG k-ε و SST k-ω و ۲ مدل تابشی Discrete Ordinates (DO) و Surface to Surface (S2S) و هندسه مدل شده به صورت دو بعدی و سه بعدی و بررسی مقیاس های مختلف مدل سه بعدی و ابعاد مختلف مش که دقت و استقلال نتایج از ابعاد شبکه را تضمین کند با نتایج آزمایشگاهی همان نمونه مشخص نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی که در سال ۲۰۰۷ در شرایط آزمایشگاهی در دانشگاه سالفورد انگلستان توسط می و همکاران [۴] با اعمال شرایط مرزی مختلف، نتایج دما و سرعت جریان هوا در حفره میانی در مقاله ای [۴] گزارش شده، مقایسه گردید و متناسب ترین مدل آشفتگی، تابشی، هندسی و ابعاد شبکه مش در شبیه سازی نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی با نرم افزار فلونت (Ansys Fluent-Ver)

(معادلات ناویر استوکس<sup>۱</sup>) را می توان با استفاده از روش های المان محدود<sup>۲</sup> حل کرد [۱۲]. در روش دینامیک سیالات محاسباتی، تعدادی از محققان کد یا نرم افزار خود را برای تجزیه و تحلیل حرارتی و جریان هوا در نمای دوپوسته استفاده کرده اند [۱۳، ۱۴]. اما اکثر محققان در مطالعات خود از بسته های نرم افزاری تجاری دینامیک سیالات محاسباتی مانند انسیس فلونت<sup>۳</sup>، تاس<sup>۴</sup>، کامسول<sup>۵</sup> و فونیکس<sup>۶</sup> استفاده کرده اند [۱۵، ۱۶، ۱۷].

قطه قوت اصلی در روش دینامیک سیالات محاسباتی، توانایی آن در شبیه سازی دقیق سرعت، دما و میدان فشار است که می توان اطلاعات دقیقی در مورد عملکرد حرارتی و تبدلات انرژی در نمای دوپوسته استخراج نمود، هر چند زمان زیادی برای انجام محاسبات صرف شود [۱۸، ۱۹]. تجزیه و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی در نماهای دوپوسته معمولا برای فرایند بهینه سازی یا حل مسائل طراحی مانند یافتن عمق حفره میانی مطلوب، انتخاب سیستم و محل سایه بان، نوع پوشش ها، مسیر جریان هوا و جریان هوا در اطراف پره های سایه بان استفاده می شود [۲۰، ۲۱، ۲۲]. انتخاب یک مدل آشفتگی ناویر استوکس با رینولدز متوسط مناسب برای جریان هوای داخل حفره میانی، تا حد زیادی دقت شبیه سازی دینامیکی و سیالاتی را مشخص می کند. علاوه بر مدل آشفتگی<sup>۷</sup>، سایر اجزای یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی که بر میزان اطمینان در نتایج و زمان محاسبه تاثیر می گذارند شامل، الگوریتم فشار-سرعت، نوع شبکه محاسباتی، مدل تابشی و تعریف دقیق شرایط مرزی هستند [۲۲، ۲۳]. برای اطمینان از نتایج شبیه سازی های عددی و دینامیک سیالات محاسباتی، اعتبار سنجی با استفاده از نتایج روش های تجربی (آزمایشگاهی) حائز اهمیت است، باید توجه داشت که تعداد کمی از مطالعات تجربی در نماهای دوپوسته، هر دو اندازه گیری های حرارتی و سرعت جریان هوا در حفره را گزارش کرده اند.

برای دستیابی به عملکرد مناسب حرارتی نمای دو پوسته از جمله کاهش مصرف انرژی سرمایشی در فصل تابستان و یا مصرف انرژی گرمایشی در فصل زمستان، طراحی مناسب و تطبیق آن با شرایط اقلیمی دارای اهمیت است. هندسه نما، مسیر جریان هوا، عمق حفره میانی، سطح باز ورودی و خروجی نما، موقعیت و زاویه سایه بان و جنس شیشه و سایه بان، اصلی

<sup>5</sup> COMSOL

<sup>6</sup> Phoenics

<sup>7</sup> Turbulance Model

<sup>8</sup> Turbulance Model

<sup>1</sup> Navier-Stokes equations

<sup>2</sup> Finite Element

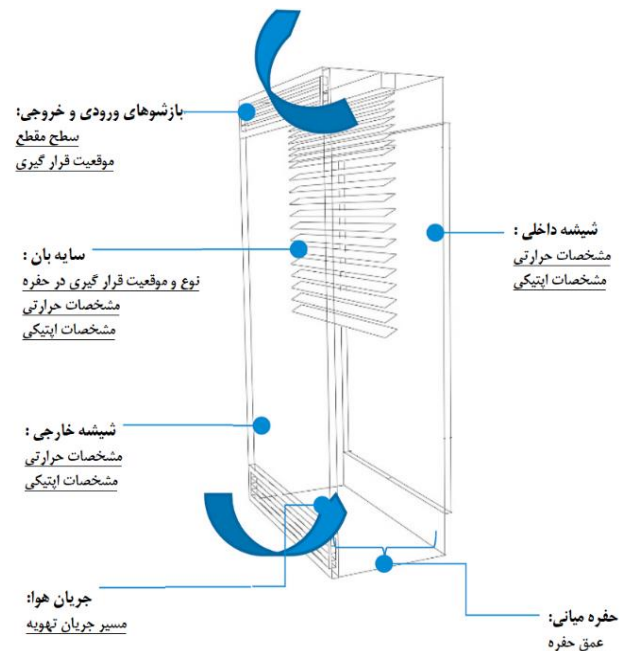
<sup>3</sup> Ansys FLUENT

<sup>4</sup> Tas Engineering

## ۲- پیشینه پژوهش

نویسندگان این مقاله ۲۵ پژوهش مبتنی بر شبیه سازی نمای دوپوسته با ورژن های مختلف نرم افزار فلونت را مورد بررسی قرار دادند. هدف از بررسی این پژوهشها، مشخص نمودن انواع مدل های آشفستگی، تابشی، دو بعدی و سه بعدی بودن مدل هندسی در شبیه سازی نمای دوپوسته با تهویه طبیعی به کار گیری شده از طرف سایر پژوهشگران در نرم افزار فلونت است. در جدول شماره ۱ به برخی از پژوهش های بررسی شده اشاره می گردد. با بررسی شبیه سازی های انجام شده در پژوهش های پیشین، مدل های آشفستگی RNG k-ε و SST k-ω و K-ε standard، مدل های تابشی Discrete Ordinates (DO) و Surface to Surface (S2S) و solar ray tracing، مدل های هندسی دوپوستی و سه بعدی، مش بندی ساختار یافته مثلثی و مکعبی برای حالت سه بعدی و مش بندی ترکیبی برای حالت دو بعدی و الگوریتم حل Simple بیشترین استفاده را در نرم افزار فلونت از طرف محققان داشته اند. بدین ترتیب در این پژوهش، نتایج حاصل شده از شبیه سازی یک نمونه مشخص نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی با نرم افزار فلونت و با در نظر گرفتن ۲ مدل آشفستگی جریان RNG k-ε و SST k-ω و ۲ مدل تابشی Discrete Ordinates (DO) و Surface to Surface (S2S) و هندسه مدل شده به صورت دو بعدی و سه بعدی و بررسی مقیاس های مختلف مدل سه بعدی و ابعاد مختلف مش که دقت و استقلال نتایج از ابعاد شبکه را تضمین کند با نتایج آزمایشگاهی همان نمونه مشخص نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی که در سال ۲۰۰۷ در شرایط آزمایشگاهی در دانشگاه سالفورد انگلستان توسط می و همکاران [۴] با اعمال شرایط مرزی مختلف، نتایج دما و سرعت جریان هوا در حفره میانی در مقاله ای [۴] گزارش شده، مقایسه گردید.

(R2 2019) را که منجر به دقیق ترین نتایج شبیه سازی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی می و همکاران [۴] و کمترین زمان محاسبات کامپیوتری گردد، مشخص شد. اگرچه در برخی از پژوهش های انجام شده تا کنون به بررسی مدل های مختلف آشفستگی یا تابشی در شبیه سازی نمای دوپوسته پرداخته شده، لیکن پژوهشی که به بررسی همزمان تاثیر مدل های مختلف آشفستگی و تابشی و هندسه مدل شبیه سازی شده به صورت دوپوستی و سه بعدی با مقیاس های مختلف در دقت نتایج حاصل از شبیه سازی، پرداخته باشد مشاهده نشد. ضمن آنکه با بررسی مقیاس های مختلف مدل سه بعدی شبیه سازی شده، راهکاری برای کاهش زمان محاسبات کامپیوتری شبیه سازی با نرم افزار برای مدلسازی سه بعدی نمای دوپوسته جعبه ای ارائه شد.



شکل ۱ ویژگی های ساختاری موثر بر رفتار حرارتی و دینامیک سیالاتی نمای دوپوسته با تهویه طبیعی

جدول ۱ پارامترهای انتخاب شده در شبیه سازی نمای دوپوسته با تهویه طبیعی با استفاده از نرم افزار فلونت در پژوهش های پیشین

ردیف	مرجع	مدل آشفستگی سیال هوا	مش بندی	مدل هندسی	الگوریتم حل	مدل تابش
۱	Cherif et al., 2020 [8]	RNG k-ε	مش ۲ سانتیمتر	سه بعدی	-	Discrete Ordinates
۲	Lucchino et al., 2019 [11]	standard k-ε	مش ترکیبی (مستطیل و مثلث)	سه بعدی	Simple	Discrete Ordinates
۳	Colombo et al., 2017 [14]	RNG k-ε	ساختار یافته مثلثی	دو بعدی	Simple	Surface to Surface
۴	Hassanli et al., 2018 [16]	k-ω SST	ساختار یافته مکعبی	سه بعدی	Simple	solar ray tracing
۵	Hou et al., 2020 [19]	RNG k-ε	ساختار یافته مثلثی	سه بعدی	Simple	Discrete Ordinates

P1	Simple	سه بعدی	مش ۲*۵/۱۲*۱ میلیمتر	RNG k-ε	Inan et al., 2017 [21]	۶
Discrete Ordinates	Coupled	دو بعدی	مش ۵ تا ۲۰ میلیمتر	RNG k-ε SST k-ω	Ikrima & Mohammad, 2017 [24]	۷
-	pressure-based solver	سه بعدی	ساختار یافته مکعبی	SST k-ω	Hassanli et al., 2018 [25]	۸
Discrete Ordinates	Simple	دو بعدی	مش ترکیبی (مستطیل و مثلث)	RNG k-ε	Li et al., 2019 [26]	۹
Discrete Ordinates	Coupled	سه بعدی	ساختار یافته مثلثی	RNG k-ε	Tao et al., 2020 [27]	۱۰

شامل رانش جریان شناوری، همرفتی طبیعی و مدل های پرتو زایی می شوند دارای پیچیدگی بیشتری هستند. معادله ۳ معادله انرژی برای انتقال گرما به سه روش رسانش، همرفتی و تابشی است [۲۸].

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (۱)$$

$$\frac{\delta}{\delta t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (۲)$$

$$\frac{\delta}{\delta t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + \rho)) = -\nabla \cdot \left( \sum_{i=1}^n h_i J_i \right) + S_h \quad (۳)$$

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ a_k u_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (۴)$$

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \rho(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (۵)$$

معادله ۴ نشان دهنده مدل آشفتگی RNG k-ε و معادله ۵ نشان دهنده مدل تابشی DO در نرم افزار فلونت است. در معادلات ۱ تا ۵، ρ چگالی بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، t زمان بر حسب ثانیه، بردار سرعت بر حسب متر بر ثانیه، S شار گرمایی بر حسب وات بر مترمربع، P فشار بر حسب نیوتن بر متر مربع، g شتاب ثقل بر حسب متر بر مجذور ثانیه، F بردار نیرو، k انرژی جنبشی متلاطم بر حسب ژول، ε نرخ اتلاف آشفتگی، α ضریب جذب و n ضریب شکست است.

### ۲-۳- مدل آزمایشگاهی

با توجه به اینکه مدل نمای دوپوسته جعبه ای شبیه سازی شده با نرم افزار فلونت در این پژوهش، همان نمای دوپوسته استفاده شده در آزمایش توسط می و همکاران [۴] است، در شکل ۲ نمای دو پوسته مورد آزمایش توسط می و همکاران [۴] نشان

### ۳- روش تحقیق

روش تحقیق بر مبنای مطالعات کتابخانه ای جهت بررسی سوابق و پیشنهاد، مدل سازی و شبیه سازی کامپیوتری با نرم افزار Ansys Fluent-Ver 2019 R2 و مقایسه ی نتایج حاصل از شبیه سازی با واقعیت اندازه گیری شده آزمایشگاهی (انجام شده توسط می و همکاران [۴]) است. برای اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی با نرم افزار فلونت، از اندازه گیری های آزمایشگاهی بر روی همان نمونه نمای دوپوسته جعبه ای که توسط می و همکاران [۴] انجام شده، استفاده شد. اندازه گیری های می و همکاران [۴] دو خصوصیت بارز بدین شرح دارد [۲]:

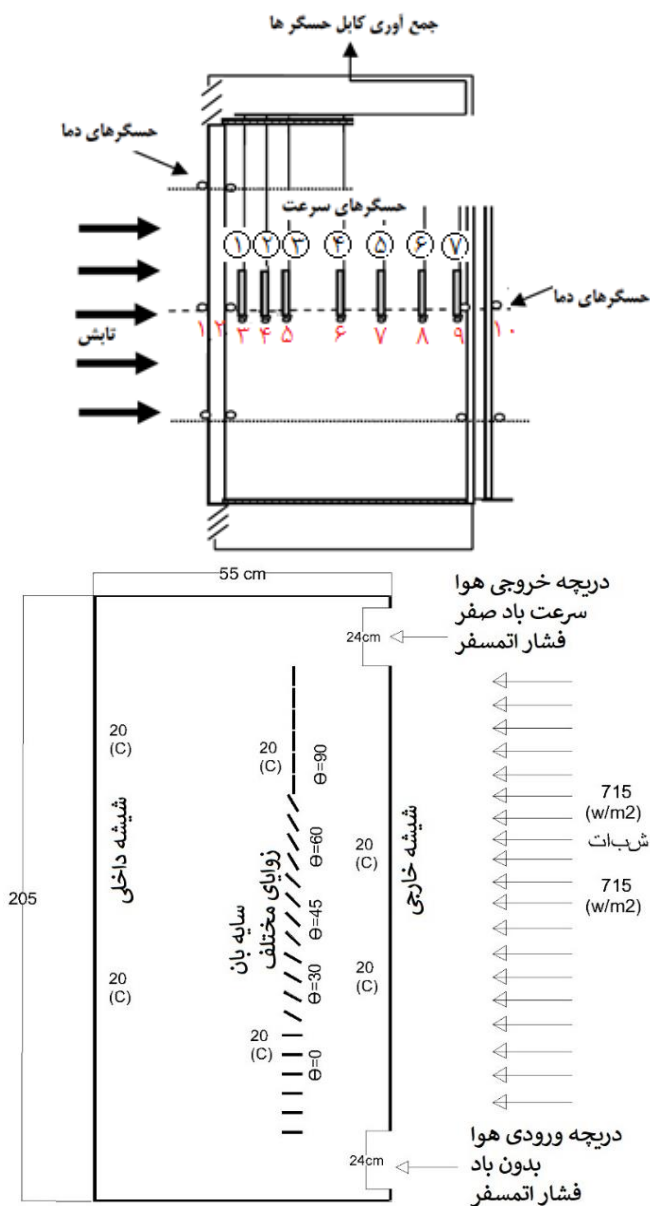
- اندازه گیری بر روی نمونه آزمایشگاهی انجام شده و لذا پارامتر های خارجی مانند اثر باد و یا باز تابش های ساختمان های اطراف بر نتایج تاثیری ندارد.

- اندازه گیری های دما و سرعت توسط می و همکاران، در ارتفاع های مختلف و در چندین مقطع انجام و ارائه شده و در نتیجه با توجه به گستردگی کمیت اندازه گیری ها و کیفیت آزمایش، می تواند با نتایج شبیه سازی کامپیوتری با نرم افزار فلونت مورد مقایسه قرار گیرد.

### ۳-۱- معادلات حاکم

در نرم افزار فلونت، جریان هوا با استفاده از معادلات پایستگی جرم و تکانه محاسبه می شود. شناوری حرارتی، مکانیزم اصلی جریان هوا در درون فضای نمای دو پوسته است. معادله ۱ بیانگر پایستگی جرم و یا معادله پیوستگی است. معادلات پایستگی تکانه در یک قاب مرجع اینرسی (بدون شتاب) به صورت معادله ۲ است. انتقال گرما می تواند توسط سه روش رسانش، همرفتی و تابشی رخ دهد. مدل های فیزیکی که فقط رسانش یا همرفت می شوند از ساده ترین مدل ها بوده در حالی که مدل هایی که

سازی و نتایج آزمایشگاهی می و همکاران، بهترین گزینه شبیه سازی نمای دوپوسته با تهویه طبیعی که دقیق ترین نتایج و کمترین زمان محاسبات را دارد، مشخص شود.



شکل ۲ الف- محل تعبیه ۱۰ عدد حسگر حرارتی و ۷ عدد سرعت سنج در مقطع نمای دو پوسته آزمایشگاهی می و همکاران(بالا) [۴] ب- ابعاد مقطع نمونه آزمایشگاهی می و همکاران و شرایط مرزی اعمال شده (پایین) [۴]

گزینه های شبیه سازی:

- مدل های آشفتگی جریان SST k- $\omega$ , RNG k- $\epsilon$
- مدل های تابشی Surface, Discrete Ordinates(DO) to Surface(S2S)
- مدل هندسی دو بعدی و سه بعدی - مقیاس های مختلف مدل سه بعدی، مقیاس شده در راستای عرض پنجره نمای ساختمان به مقیاس های ۰.۲۵، ۰.۳۳، ۰.۵۰ و مقیاس واقعی ۱۰۰

داده شد. نتایج مختلفی از اندازه گیری ها شامل سرعت جریان هوا به وسیله ۷ حسگر سرعت در حفره میانی و دما به وسیله ۱۰ حسگر دما، تعبیه شده روی شیشه ها و در مقطع حفره میانی، اندازه گیری و ثبت گردید (شکل ۲-الف). ابعاد این نمونه، مشخصات تابشی و شرایط مرزی به شرح زیر است:

پوسته خارجی نمای دو پوسته شیشه شفاف تک جداره به ضخامت ۱۲ میلیمتر با عرض ۱۴۵ سانتیمتر و ارتفاع ۲۰۵ سانتیمتر داخل قاب آلومینیومی است. ورودی و خروجی هوا از شبکه ای به ابعاد ۲۴ سانتیمتر ارتفاع در ۱۴۵ سانتیمتر عرض تشکیل شده است. سایه بان از نوع کرکره ای با جنس آلومینیوم رنگ روشن است. سایه بان کرکره ای با عرض ۱۴۵ سانتیمتر و ارتفاع ۲۰۰ سانتیمتر بود. هر ردیف کرکره سایه بان دارای عرض ۸ سانتیمتر و ضخامت ۱ سانتیمتر بوده و نتایج آزمایش می و همکاران برای حالات زاویه ای ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ درجه و حالت بدون سایه بان ارائه شده است. عرض حفره میانی ۵۵ سانتیمتر و محل قرار گیری سایه بان در یک سوم سمت خارجی نمای دو پوسته به سمت لایه خارجی نما تعبیه شده است (شکل ۲-ب). دمای داخل و خارج نمای دو پوسته در هنگام شروع آزمایش ۲۰ درجه سانتیگراد و شدت تابش به صورت ثابت برابر ۷۱۵ وات بر متر مربع و به صورت عمود بر سطح شیشه خارجی نما تابانیده شد (شکل ۲) [۴]. در جدول ۲ مشخصات حرارتی مصالح نمای دوپوسته شامل شیشه و سایه بان آلومینیومی که در نرم افزار فلونت اعمال شده، ارائه گردید.

جدول ۲ مشخصات مصالح اعمال شده در نرم افزار فلونت [۲۸]

سایه بان آلومینیومی	شیشه معمولی	مشخصات مصالح
۲۷۱۹	۲۵۰۰	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
۸۷۱	۸۴۰	گرمای ویژه ( $\text{J/kg.k}$ )
۲۰۲/۴	۱/۷	رسانایی گرمایی ( $\text{w/m.k}$ )
-	۳۰	ضریب جذب ( $1/m$ )
۱/۴۴	۱/۵	ضریب شکست
۰/۷	۰/۸۴	ضریب گسیل
-	۰/۸۴	ضریب گذر خورشیدی
-	۰/۰۷۵	ضریب انعکاس خورشیدی
-	۰/۰۸۵	ضریب جذب خورشیدی

### ۳-۳- شبیه سازی در نرم افزار فلونت

مدل آزمایشگاهی می و همکاران با استفاده از نرم افزار فلونت و مطابق گزینه های زیر مدل شد تا با مقایسه نتایج حاصل از شبیه

مش ۸ میلیمتری و زاویه های سایه بان ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه و اندازه گیری های آزمایشگاهی می و همکاران نشان داده شد.

جدول ۳ الف- درصد خطای دما حاصل از شبیه سازی با نرم افزار فلوئنت نسبت به اندازه گیری های آزمایشگاهی می و همکاران ب- درصد خطای سرعت در حفره میانی حاصل از شبیه سازی با نرم افزار فلوئنت نسبت به اندازه گیری های آزمایشگاهی می و همکاران-زاویه سایه بان ۴۵ درجه و مش ۸ میلیمتری

شماره حسگر گزینه های شبیه سازی	شماره حسگر							
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
RNG k-ε +DO+2D	۹/۱	۲۴/۱	۲۷/۷	۲۷/۸	۲۰/۷	۲۴/۹	۲۸/۳	۲۷/۲
RNG k-ε +DO+3D	۲/۲	۱۸/۳	۱۹/۸	۲۱/۵	۵/۵	۱۴/۹	۱۷/۱	۱۴/۴
RNG k-ε +S2S+2D	۱۴/۴	۲۴/۵	۲۸/۹	۲۴/۱	۱۸/۳	۲۰/۴	۲۷/۴	۲۳/۰
RNG k-ε +S2S+3D	۸/۷	۱۴/۳	۲۲/۹	۲۴/۰	۱۳/۵	۱۸/۷	۱۹/۴	۱۹/۹
SST k-ω +DO+2D	۱۲/۹	۲۷/۴	۲۸/۱	۳۲/۴	۱۸/۰	۲۴/۲	۲۵/۷	۲۹/۴
SST k-ω +DO+3D	۷/۳	۱۶/۱	۱۹/۳	۲۴/۴	۱۱/۱	۱۸/۱	۱۸/۷	۱۶/۷
SST k-ω +S2S+2D	۹/۷	۲۵/۲	۲۴/۱	۳۳/۸	۱۴/۹	۲۴/۲	۲۳/۰	۲۸/۳
SST k-ω +S2S-3D	۵/۸	۲/۰	۸/۷	۲۹/۴	۱۳/۹	۱۷/۵	۱۹/۴	۱۷/۲

شماره حسگر گزینه های شبیه سازی	شماره حسگر							
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
RNG k-ε +DO+2D	۸/۴	۷/۱	۱/۱	۱/۱	۷/۱	۱/۲	۳/۲	۳/۲
RNG k-ε +DO+3D	۲/۵	۵/۱	۱/۳	۸/۷	۳/۱	۵/۵	۳/۲	۳/۲
RNG k-ε +S2S+2D	۱/۰	۷/۱	۴/۱	۲/۰	۱/۲	۱/۱	۱/۱	۱/۱
RNG k-ε +S2S+3D	۶/۷	۷/۱	۱/۱	۴/۱	۱/۷	۵/۵	۱/۲	۱/۲
SST k-ω +DO+2D	۱/۲	۴/۲	۱/۱	۴/۶	۱/۶	۱/۷	۱/۷	۱/۷
SST k-ω +DO+3D	۴/۴	۳/۱	۱/۷	۱/۰	۱/۵	۱/۱	۳/۶	۳/۶
SST k-ω +S2S+2D	۱/۷	۴/۱	۵/۱	۷/۱	۶/۱	۵/۵	۱/۲	۱/۲
SST k-ω +S2S-3D	۸/۷	۷/۱	۴/۱	۱/۷	۳/۱	۵/۵	۱/۰	۱/۰

ابعاد مختلف مش بندی جهت بررسی استقلال نتایج از ابعاد شبکه مش بندی از نوع ساختار یافته به صورت خطی<sup>۱</sup> از نوع مثلث بندی<sup>۲</sup> با الگوریتم تطابق تکه<sup>۳</sup>

الگوریتم حل Simple، طرح متغیر های Second-order scheme، متغیر فشار Body-force weighted، همگرایی متغیر ها به جز انرژی تا  $10e^{-6}$  و همگرایی برای متغیر انرژی تا  $10e^{-3}$  استفاده شد.

#### ۴- نتایج و بحث

برای تعیین بهترین مدل آشفتگی، مدل تابشی و مدل هندسی برای بدست آمدن دقیق ترین و نزدیکترین نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار فلوئنت در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی می و همکاران، ۹۰ شبیه سازی برای ۱۸ حالت، ۳ مدل آشفتگی، ۳ مدل تابشی و ۲ حالت مدل دو بعدی یا سه بعدی بودن مدل هندسی با اندازه مش ۸ میلیمتری و زاویه های سایه بان ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه انجام شد.

#### ۴-۱- محاسبات خطا

در جدول ۳، مقایسه (درصد خطا) بین نتایج آزمایشگاهی می و همکاران و نتایج شبیه سازی با نرم افزار فلوئنت مربوط به ۲ مدل آشفتگی RNG k-ε و SST k-ω، ۲ مدل تابشی Discrete Ordinates (DO) و Surface to Surface (S2S) و دو بعدی یا سه بعدی بودن مدل هندسی با اندازه مش ۸ میلیمتری و زاویه سایه بان ۴۵ درجه در هر ۸ حالت، برای پارامتر های دمای سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته و سرعت جریان تهویه در حفره میانی نمای دو پوسته ارائه شد. مقایسه درصد خطای نتایج شبیه سازی های انجام شده با نتایج آزمایشگاهی می و همکاران، در جدول ۳-الف (دما در مقطع نما) و ۳-ب (سرعت جریان هوا در مقطع نما) نشان داد، شبیه سازی با نرم افزار فلوئنت، مدل هندسی سه بعدی نسبت به مدل دوبعدی، مدل تابشی DO و مدل آشفتگی RNG k-ε نسبت به سایر مدل ها، نتایج دقیق تر و نزدیکتری به نتایج آزمایشگاهی می و همکاران را حاصل می کند. در جدول ۳ مقایسه ای بین نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار فلوئنت برای مدل آشفتگی RNG k-ε، مدل تابشی DO و مدل هندسی سه بعدی و اندازه

<sup>3</sup> Patch Conforming

<sup>1</sup> Linear

<sup>2</sup> Tetrahedrons

۳- با توجه به اینکه پارامتر اصلی خروجی نرم افزار، دما در محل دیواره ها (شیشه های داخلی و خارجی و سایه بان) نسبت به سایر نقاط مقطع نمای دوپوسته است، بنابراین ابعاد شبکه در محل دیواره ها ریزتر (۸ میلیمتر) بوده و با فاصله گرفتن از دیواره ها، ابعاد شبکه به تدریج بزرگتر (تا ۲۰ میلیمتر) تعریف شده است لذا نتایج در محل دیواره ها نسبت به سایر نقاط دقیق تر و مقدار خطا کمتر است. ابعاد مش یکسان (۸ میلیمتر) برای تمامی نقاط نمای دوپوسته باعث می شود زمان محاسبات کامپیوتری از ۴۰ تا ۵۰ ساعت برای شبیه سازی نمای دوپوسته جعبه ای سه بعدی، به حدود ۱۲۰ ساعت افزایش یابد.

#### ۴-۲- بررسی استقلال نتایج شبیه سازی از شبکه و مقیاس هندسه سه بعدی مدل شده

مطابق جدول ۳ مشخص شد، مدل سازی با هندسه سه بعدی نسبت به هندسه دوبعدی، منتج به نتایج دقیق تری می شود. در مدل سه بعدی واقعی، نمای دو پوسته به ابعاد ۵۵ سانتیمتر عمق مقطع (راستای محور  $X$ )، ارتفاع مقطع ۲۰۵ سانتیمتر (راستای محور  $Y$ ) و طول مقطع ۱۴۵ سانتیمتر (راستای محور  $Z$ ) مدل می شود. با توجه به اینکه از نظر تئوری، حرکت جریان هوا به سبب گرم شدن هوا و کاهش چگالی، از دریچه ورودی هوا (پایین مقطع) به سمت دریچه خروجی هوا (بالای مقطع) شکل می گیرد و جریان هوا در راستای طول مقطع (محور  $Z$ ) ناچیز است، بنابراین مدل های سه بعدی با شرایطی که مقطع نمای دو پوسته (محورهای  $X$  و  $Y$ ) در ابعاد واقعی و طول مقطع در راستای محور  $Z$  به مقدار های ۲۰٪، ۳۳٪ و ۵۰٪ طول واقعی مقیاس شده تا در صورت استقلال نتایج شبیه سازی از مقیاس کردن مدل هندسی سه بعدی و در راستای کاهش حجم محاسبات کامپیوتری، مدل هندسی سه بعدی با کوچکترین مقیاس در شبیه سازی با نرم افزار استفاده شود (شکل ۴).

ابعاد مش تاثیر مستقیمی بر مقدار زمانی محاسبات شبیه سازی دارد. هرچه ابعاد مش بندی ریزتر باشد، زمان محاسبات در نرم افزار فلونتت زیاد تر می شود ضمن آنکه در صورتی که ابعاد مش بزرگتر از مقدار لازم باشد جوابها دقیق نخواهد بود. با توجه به نوع جریان سیال در حفره میانی نمای دو پوسته، برای تعیین ابعاد مش بندی بهینه، پارامتر  $Y$  پلاس بایستی در نزدیکترین شبکه به دیواره ها کمتر یا مساوی عدد ۱ باشد. مش بندی با ابعاد زیر در نرم افزار فلونتت انجام شد:

- مش بندی به ابعاد ۷ میلیمتر
- مش بندی به ابعاد ۸ میلیمتر

علی رغم آنکه شبیه سازی نمای دوپوسته در نرم افزار فلونتت با مدل آشفتگی RNG k- $\epsilon$ ، مدل تابشی DO و مدل هندسی سه بعدی دقیق ترین نتایج را حاصل می کند اما زمان انجام یک شبیه سازی نمای دوپوسته جعبه ای سه بعدی با مش بندی ۸ میلیمتری در حدود ۴۰ تا ۵۰ ساعت است. بنابراین بایستی راهکارهایی پیش بینی شود تا علیرغم حفظ دقت نتایج، زمان و حجم محاسبات کاهش یابد. راهکار بررسی شده در این مقاله تغییر مقیاس مدل سه بعدی شبیه سازی شده با حفظ استقلال نتایج از ابعاد شبکه و بدون کاهش دقت نتایج حاصل شده از شبیه سازی نمونه مقیاس شده است.

نتایج جدول ۳ و شکل ۳ نشان می دهد نتایج شبیه سازی مربوط به پارامتر های دما و سرعت جریان هوا، در بهترین حالت (مدل آشفتگی RNG k- $\epsilon$ ، مدل تابشی DO و مدل هندسی سه بعدی و مش به ابعاد ۸ میلیمتر)، در نزدیکی دیواره ها (شیشه ها و سایه بان)، خطای تا ۱۰٪ و در بقیه نقاط مقطع نمای دوپوسته که از دیواره ها فاصله می گیرد خطای تا ۲۰٪ را نسبت به نتایج آزمایشگاهی می و همکاران نشان می دهد. در حالی که نتایج حاصل از شبیه سازی مستقل از ابعاد مش هستند، علت بروز اختلاف بین نتایج شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی می و همکاران می تواند به ترتیب الویت ناشی از موارد زیر باشد:

۱- در جدول ۲ مشخصات حرارتی مصالح نمای دوپوسته که در نرم افزار فلونتت اعمال شده، ارائه شده است لیکن در مقاله می و همکاران [۴] که در آن شرح آزمایش و نتایج اندازه گیری ها گزارش شده است، جنس دقیق مصالح شامل ضرائب جذب، گسیل و انعکاس حرارتی شیشه و آلومینیوم به کار رفته در نمونه آزمایشگاهی گزارش نشده و فقط جنس شیشه از نوع معمولی و جنس سایه بان از نوع آلومینیوم رنگ روشن گزارش شده است. در مقالات تائو و همکاران [۲۷]، کیم [۲۲]، ایی و همکاران [۲۸] و پاسوت و دی کارلی [۲] از نتایج ثبت شده آزمایشگاهی می و همکاران [۴] برای صحت سنجی روش شبیه سازی نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی با نرم افزار فلونتت استفاده شده و اعداد جدول ۲ مربوط به جنس مصالح اعمالی در نرم افزار نیز از مقالات مذکور [۲۸] استخراج شده که ممکن است با جنس واقعی مصالح نمونه آزمایشگاهی می و همکاران اختلاف داشته باشد.

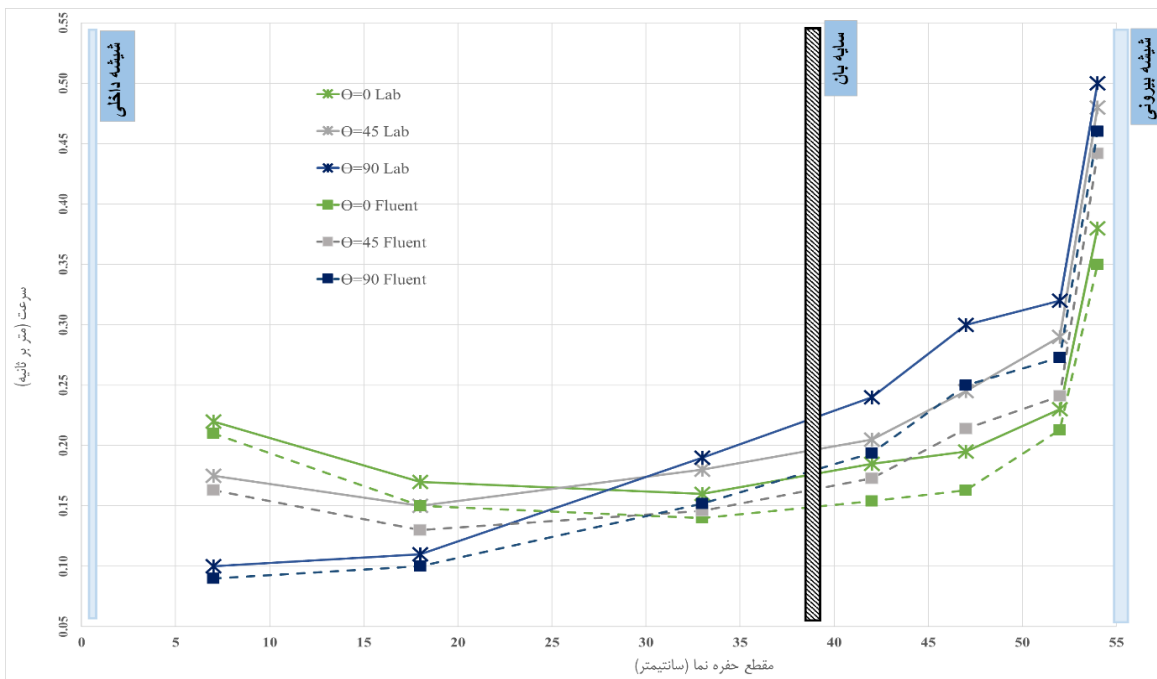
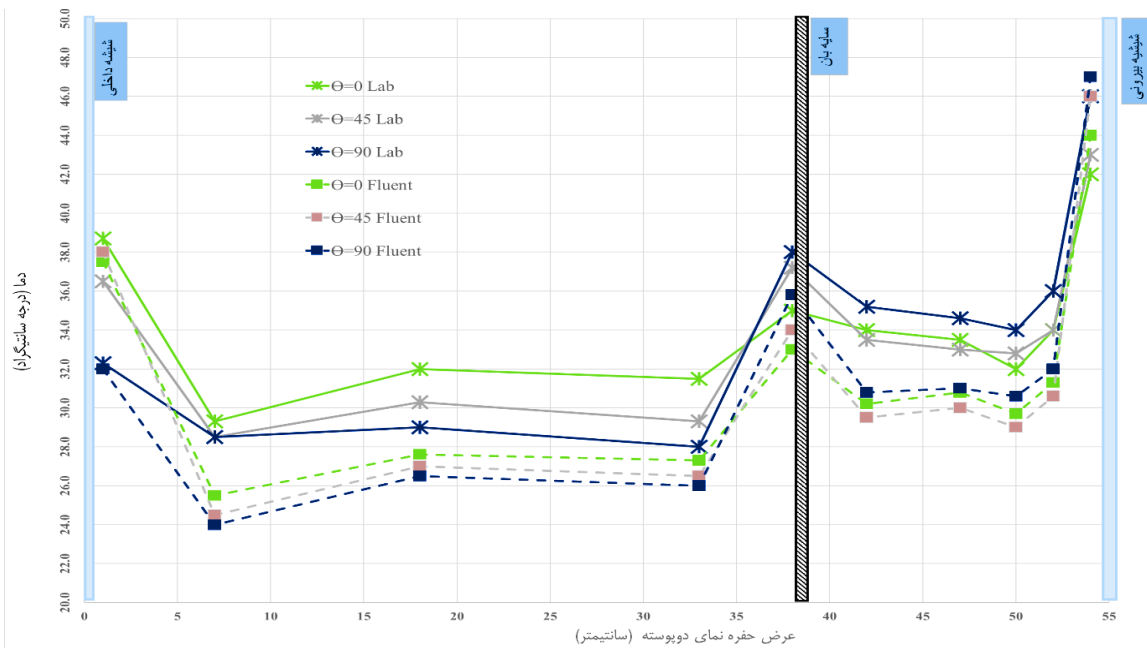
۲- محدودیت های مدل های آشفتگی جریان RNG k- $\epsilon$  و SST k- $\omega$ ، مدل های تابشی DO و S2S، الگوریتم حل Simple و طرح متغیر ها که شبیه سازی با این مدل ها و الگوریتم ها در نرم افزار انجام می شود.



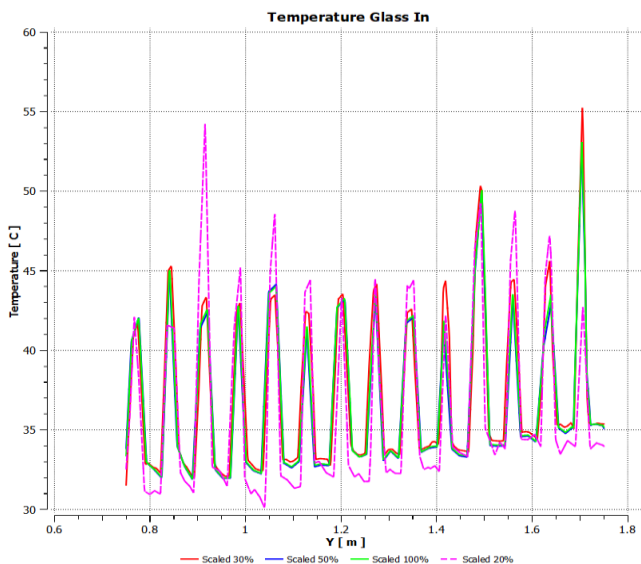
مستقل از ابعاد شبکه است. در شکل ۶ استقلال پارامتر دمای سطح شیشه داخلی در ارتفاع بین ۰/۷۵ تا ۱/۷۵ متر در وسط شیشه حاصل شده از شبیه سازی با نرم افزار، برای چهار حالت مقیاس هندسه نمونه سه بعدی مدل شده در نرم افزار نشان داده شد. مطابق شکل ۶، پارامتر دمای سطح شیشه داخلی برای مقیاس ۲۰٪ با مقیاس های ۳۳٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ اختلاف بیشتری دارد و بنابراین نتایج برای مقیاس های ۳۳٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ مستقل از ابعاد شبکه است.

مش بندی به ابعاد ۹ میلیمتر  
 - مش بندی به ابعاد ۱۰ میلیمتر  
 - مش بندی به ابعاد ۱۱ میلیمتر

در شکل ۵ استقلال پارامتر دمای سطح شیشه داخلی در ارتفاع بین ۰/۷۵ تا ۱/۷۵ متر در وسط شیشه حاصل شده از شبیه سازی با نرم افزار، برای پنج حالت ابعاد مش نشان داده شد. مطابق شکل ۵، پارامتر دمای سطح شیشه داخلی برای مش به ابعاد ۹، ۱۰ و ۱۱ میلیمتر با مش به ابعاد ۷ و ۸ میلیمتر اختلاف بیشتری دارد و بنابراین نتایج برای مش ۷ و ۸ میلیمتری



شکل ۳ مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار فلوئنت (خط چین) برای مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  و مدل تابشی DO، مدل هندسی سه بعدی و اندازه مش ۸ میلیمتری و زاویه های سایه بان ۰، ۳۰ و ۹۰ درجه و اندازه گیری های آزمایشگاهی می و همکاران (خط پر)، الف-دمای شیشه داخلی نما، ب-سرعت جریان هوا در حفره

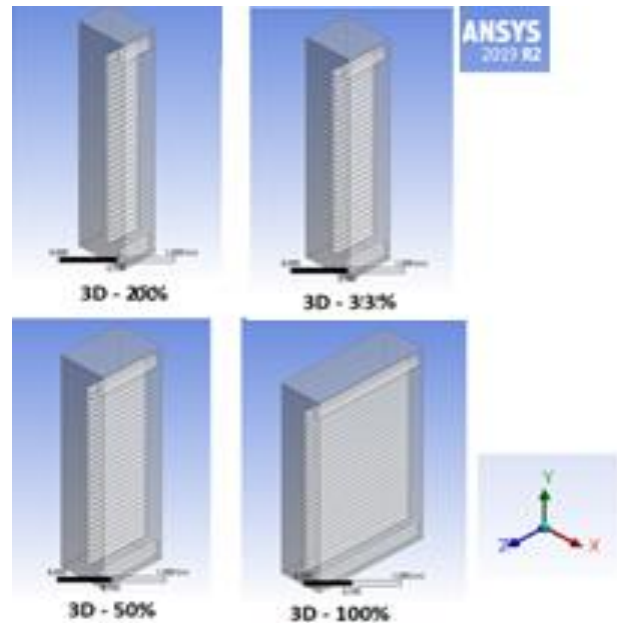


شکل ۶ بررسی استقلال دمای سطح شیشه داخلی حاصل از شبیه سازی نسبت با مش ۸ میلیمتری و مقیاس سه بعدی متفاوت ۲۰، ۳۳٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪- مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG و مدل تابشی DO

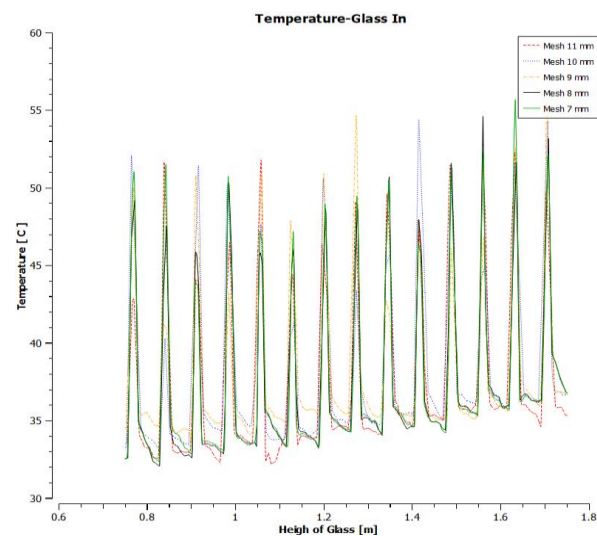
### ۴-۳- تحلیل نتایج

در شکل ۷ مقایسه دمای سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته در حالات سه بعدی با مقیاس های مختلف و مش ۸ میلیمتری با نتایج آزمایشگاهی می و همکاران ارائه شد. مطابق این شکل نتایج دما در روی سطح شیشه داخلی برای حالات مختلف زاویه سایه بان، برای نمونه های با مقیاس ۳۳٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ نزدیکترین نتایج را نسبت به شرایط آزمایشگاهی می و همکاران [۴] دارد و نمونه های با مقیاس ۲۰٪، نتایج با دقت کمتری را نشان می دهد. در شکل ۸ مقایسه دمای سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته در حالت مقیاس ۳۳٪ سه بعدی و با ابعاد مش مختلف با نتایج آزمایشگاهی می و همکاران ارائه شد. نتایج دما در روی سطح شیشه داخلی برای حالات مختلف زاویه سایه بان، برای مش ۸ میلیمتری به نتایج آزمایشگاهی می و همکاران [۴] نزدیکتر بوده و نتایج شبیه سازی نمونه های با مش ۹، ۱۰ و ۱۱ میلیمتر دقت کمتری را نشان می دهد. با بررسی نتایج حاصل شده که بخش از آنها در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شد، موارد زیر قابل ذکر می باشد:

- ۱- سرعت جریان هوا در حفره میانی و دمای سطح شیشه داخلی حاصل از شبیه سازی نسبت به شرایط آزمایشگاهی در نمونه های با مقیاس ۳۳٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ نزدیکترین نتایج را نسبت به شرایط آزمایشگاهی دارد.
- ۲- افزایش ابعاد مش منجر به افزایش اختلاف بین نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی مربوط به دما و سرعت جریان



شکل ۴ مدل های دو بعدی و سه بعدی با مقیاس های متفاوت در نرم افزار فلونت



شکل ۵ بررسی استقلال دمای سطح شیشه داخلی حاصل از شبیه سازی نسبت به ابعاد مختلف مش-مقیاس سه بعدی واقعی- مدل آشفتگی  $k-\epsilon$  RNG و مدل تابشی DO

در مورد نتایج دمای سطح شیشه داخل نمای دو پوسته برای مقیاس های ۲۰٪ تا ۱۰۰٪، اختلاف نتایج دمای شیشه داخلی نمای دو پوسته با نتایج آزمایشگاهی بین ۵/۸٪ تا ۱۹/۵٪ متغیر است. با افزایش مقیاس مدل، نتایج شبیه سازی برای دمای سطح شیشه داخل نما با واقعیت آزمایشگاهی مطابقت بیشتری را نشان می دهد که البته برای مقیاس های ۳۳٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ حساسیت این تغییر مقیاس در نتایج حاصل شده، تفاوت چندانی را نشان نمی دهد و نتایج مقیاس ۳۳٪ با نتایج مقیاس ۱۰۰٪ به یکدیگر نزدیک هستند. لذا در راستای کاهش زمان محاسبات کامپیوتری و با حفظ دقت نتایج حاصل از شبیه سازی و در نظر گرفتن استقلال نتایج از ابعاد شبکه، مدل هندسی سه بعدی مقیاس شده در راستای محور Z (مطابق شکل ۴) با مقیاس ۳۳٪، برای مدلسازی نمای دو پوسته جعبه ای در نرم افزار فلونت مناسب است.

در جدول ۴، مشخص است که در حالت مش به ابعاد ۸ میلیمتر، عدد Y پلاس نسبت به سایر موارد نزدیکتر به عدد یک می باشد. به طور مشخص، اندازه مش ۷ میلیمتر نسبت به ۸ میلیمتر، باعث کاهش مقدار Y پلاس از عدد یک می شود و زمان محاسبات کامپیوتری را حدود ۴۰٪ افزایش می دهد و لذا در راستای کاهش زمان محاسبات کامپیوتری و با حفظ دقت نتایج حاصل از شبیه سازی و در نظر گرفتن استقلال نتایج از ابعاد شبکه، اندازه مش ۸ میلیمتری برای مدلسازی نمای دو پوسته جعبه ای در نرم افزار فلونت مناسب است.

جدول ۴ مقدار Y پلاس در اولین شبکه نزدیک سطح شفاف

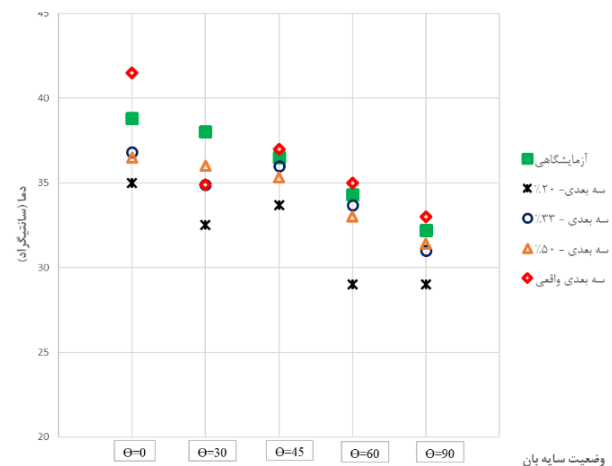
داخلی در حالات شبیه سازی با نرم افزار فلونت برای مقیاس ۳۳٪ سه بعدی و ابعاد مش متفاوت (مدل آشفتگی RNG k-ε و مدل تابشی DO)

زاویه سایه بان	۰	۳۰	۴۵	۶۰	۹۰	ابعاد مش (میلیمتر)
مش ۷	۱/۲۵	۱	۰/۴	۰/۴	۰/۲۵	۷
مش ۸	۱/۵	۰/۷۵	۱	۰/۶	۰/۶	۸
مش ۹	۱/۷۵	۱/۷۵	۲	۱/۲۵	۱/۲	۹
مش ۱۰	۲/۵	۲/۵	۳/۲۵	۲/۲۵	۲/۷۵	۱۰
مش ۱۱	۴/۵	۴/۵	۴/۲۵	۳/۵	۳/۲۵	۱۱

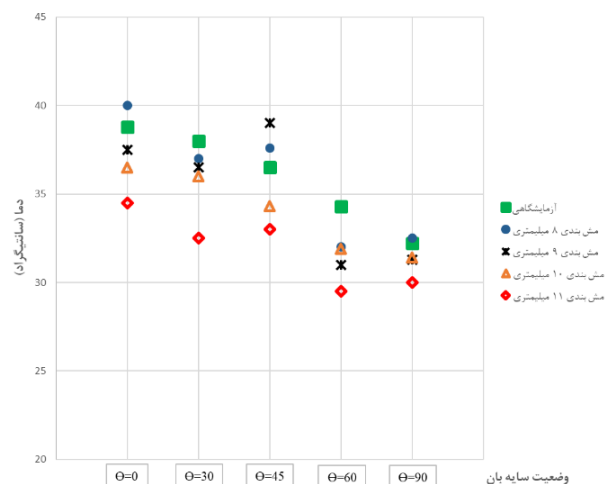
بنابراین در حالی که برای انجام محاسبات کامپیوتری شبیه سازی نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی با هندسه سه بعدی، مطابق مقالات پیشین، مقالات تائو و همکاران [۲۷]، کیم [۲۲] و

هوا می شود و همچنین نتایج شبیه سازی برای مش ۸ میلیمتری از سایر ابعاد مش به نتایج آزمایشگاهی نزدیکتر هستند.

میانگین درصد اختلاف سرعت جریان هوا، حاصل از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی برای مقیاس های ۲۰٪ تا ۱۰۰٪ بین ۵٪ الی ۲۲/۷٪ می باشد و با افزایش مقیاس مدل شبیه سازی، نتایج سرعت جریان هوا حاصل از شبیه سازی به نتایج واقعی آزمایشگاهی نزدیک تر می شود که البته برای مقیاس های ۳۳٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ حساسیت این تغییر مقیاس، در نتایج سرعت جریان هوا، تفاوت چندانی را نشان نمی دهد و نتایج مقیاس ۳۳٪ با نتایج مقیاس ۱۰۰٪ به یکدیگر نزدیک هستند.



شکل ۷ مقایسه نتایج دمای سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته در حالات شبیه سازی با نرم افزار و هندسه سه بعدی با مقیاس های مختلف (مدل آشفتگی RNG k-ε و مدل تابشی DO) با نتایج آزمایشگاهی می و همکاران، مش ۸ میلیمتری



شکل ۸ مقایسه دمای سطح شیشه داخلی نمای دو پوسته در حالات شبیه سازی با نرم افزار و هندسه با مقیاس ۳۳٪ سه بعدی و با ابعاد مش مختلف (مدل آشفتگی RNG k-ε و مدل تابشی DO) با نتایج آزمایشگاهی می و همکاران

طرف دیگر مطالعات آزمایشگاهی تنها راه اعتبار سنجی روش های عددی می باشند. دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم افزار فلونتت یکی از بهترین روش های عددی برای مطالعه در این زمینه است.

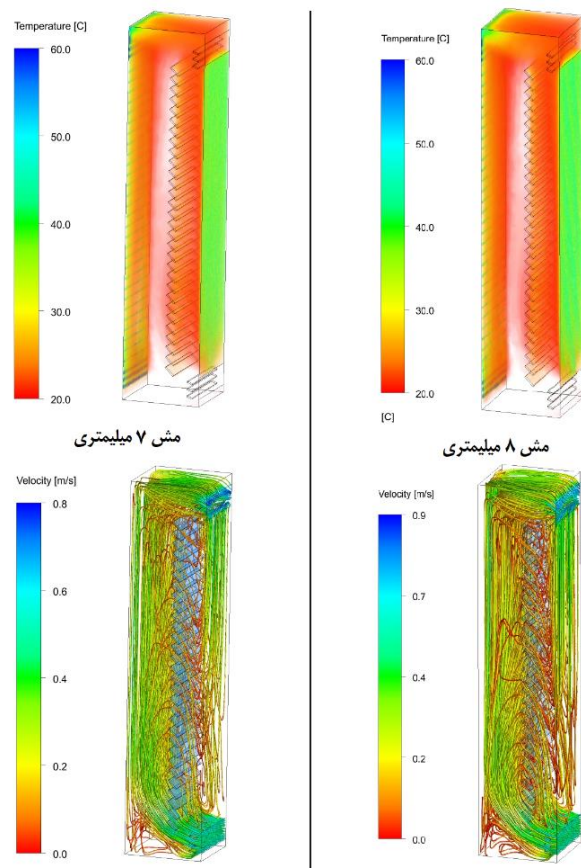
هدف از این پژوهش، ارزیابی پارامترهای مختلف شبیه سازی عملکرد حرارتی و سیالاتی نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی با نرم افزار فلونتت بود به طوری که نتایج حاصل شده از شبیه سازی با نرم افزار دارای دقت کافی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی باشد و با حفظ دقت و استقلال نتایج از ابعاد مش و مشخصات هندسی مدل شبیه سازی، مدت زمان لازم برای شبیه سازی به حداقل ممکن برسد. انتخاب درست مدل آشفتگی و تابشی، هندسه مدل شبیه سازی شده و ابعاد مش بر دقت نتایج حاصل از شبیه سازی بسیار موثر بوده، لذا در این پژوهش، نتایج حاصل شده از شبیه سازی یک نمونه مشخص نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی با نرم افزار فلونتت و با در نظر گرفتن ۲ مدل آشفتگی جریان RNG k-ε و SST k-ω و ۲ مدل تابشی Discrete Ordinates (DO) و Surface to Surface (S2S) و هندسه مدل شده به صورت دو بعدی و سه بعدی و بررسی مقیاس های مختلف مدل سه بعدی و ابعاد مختلف مش که دقت و استقلال نتایج از ابعاد شبکه را تضمین کند با نتایج آزمایشگاهی همان نمونه مشخص نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی که در سال ۲۰۰۷ در شرایط آزمایشگاهی در دانشگاه سالفورد انگلستان توسط می و همکاران با اعمال شرایط مرزی مختلف بررسی شده، مقایسه گردید و مناسب ترین مدل آشفتگی، تابشی، هندسی و ابعاد شبکه مش در شبیه سازی نمای دوپوسته جعبه ای تهویه طبیعی با نرم افزار فلونتت (Ansys Fluent-Ver 2019 R2) را که منجر به دقیق ترین نتایج شبیه سازی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی می و همکاران و کمترین زمان محاسبات کامپیوتری گردد، مشخص شد. نتایج حاصل شده به شرح زیر است:

۱- در مدلسازی پارامترهای سیالاتی موارد زیر بهترین نتایج را در شبیه سازی نماهای دو پوسته با تهویه طبیعی حاصل می کند.

- انتخاب مدل آشفتگی RNG k-ε، نتایج مناسبی را برای شبیه سازی عملکرد نماهای دو پوسته با تهویه طبیعی حاصل می نماید.

- انتخاب مدل تابشی DO، نتایج مناسبی را برای شبیه سازی عملکرد نماهای دو پوسته با تهویه طبیعی حاصل می کند.

ایمی و همکاران [۲۸] زمانی در حدود ۴۰ تا ۵۰ ساعت لازم بود، با مدل کردن نمونه مقیاس شده ۳۳٪ واقعی، زمان محاسبات کامپیوتری به حدود ۱۵ تا ۲۰ ساعت کاهش یافت در حالی که دقت نتایج حاصل از شبیه سازی کاهش نداشت و استقلال نتایج شبیه سازی نسبت به کاهش مقیاس هندسه سه بعدی شبیه سازی شده بررسی و تایید شد. در شکل ۹ کانتور دما و جریان هوای تشکیل شده در نمای دوپوسته با مقیاس ۳۳٪ واقعی و مش به ابعاد ۷ و ۸ میلی متر ارائه شد. مطابق این شکل شباهت نتایج برای مش ۷ و ۸ میلی متر قابل مشاهده و مقایسه است.



شکل ۹ کانتور دما (بالا) و جریان هوا (پایین) در نمای دوپوسته با مقیاس ۳۳٪ واقعی و مش به ابعاد ۷ (چپ) و ۸ (راست) میلی متر (مدل آشفتگی RNG k-ε و مدل تابشی DO)

## ۵- نتیجه گیری

نماهای دو پوسته به عنوان یکی از سطوح پوششی ساختمان در دهه اخیر در بسیاری از ساختمان ها مورد استفاده قرار گرفته اند. برای بررسی عملکرد حرارتی نمای دوپوسته دو روش تحقیق مطالعات آزمایشگاهی (تجربی) و آنالیز عددی وجود دارد. مطالعات آزمایشگاهی اولین و معتبرترین منبع اطلاعات است. از

United Arab Emirates, *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, (2020).

- [6] Inan, T., Basaran, T., Erek, A., Experimental and numerical investigation of forced convection in a double skin façade, *Energies*, Vol. 10 No. 9, (2017).
- [7] Dopudi, M., Naturally Ventilated Double Skin Facade: CFD and Simplified Model for Parametric Energy Simulation, *Politecnico Milano*, (2017).
- [8] Cherif, Y., Sassine, E., Lassue, S., Zalewski, L., Experimental and numerical natural convection in an asymmetrically heated double vertical facade, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 152, (2020).
- [9] Cho, K., Cho, D., Simulation of the thermal performance of a geometrically complex Double-Skin Facade for hot climates: EnergyPlus vs OpenFOAM, *Building Simulation*, Vol. 12, No. 5, pp. 781–795, (2019).
- [10] Cattarin, G., Pagliano, L., Causone, F., Kindinis, A., Goia, F., Carlucci, S., Schlemminger, C., Empirical validation and local sensitivity analysis of a lumped-parameter thermal model of an outdoor test cell, *Building and Environment*. Vol. 130, pp. 151–161, (2018).
- [11] E. Catto Lucchino, E., Goia, F., Lobaccaro, G., Chaudhary, G., Modelling of double skin facades in whole building energy simulation tools: a review of current practices and possibilities for future developments, *Building Simulation*, Vol. 12, No. 1, pp. 3–27, (2019).
- [12] Choi, H., An, Y., Kang, K., Yoon, S., Kim, T., Cooling energy performance and thermal characteristics of a naturally ventilated slim double-skin window, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 160, (2019).
- [13] Tkachenko, M., Timchenko, V., Giroux-Julien, S., Ménézo, C., Yeoh, G.H., Reizes, J.A., Sanvicente, E., Fossa, M., Numerical and experimental investigation of unsteady natural convection in a non-uniformly heated vertical open-ended channel, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 99, pp. 9–25, (2016).
- [14] Colombo, E., Zwahlen, M., Frey, M., Loux, J., Design of a glazed double-façade by means of coupled CFD and building performance simulation, *Energy Procedia*, Vol. 122, pp. 355–360, (2017).
- [15] Hachem-Vermette, C., Selected High-Performance Building Envelopes BT-Solar Buildings and Neighborhoods: Design Considerations for High Energy Performance, *Springer International Publishing*, pp. 67–100, (2020).

۲- در مدلسازی پارامترهای هندسی نمای دو پوسته، موارد زیر بهترین نتایج را برای نماهای دو پوسته با تهویه طبیعی حاصل می‌کند:

- برای کاهش زمان محاسبات، امکان کوچک کردن مقیاس نمونه سه بعدی، در راستایی که از نظر تئوری اندرکنش فیزیکی و سیالاتی رخ نمی‌دهد وجود دارد. تعیین مقیاس بهینه در مرحله صحت سنجی و با در اختیار بودن نتایج آزمایشگاهی مناسب امکان پذیر است. مطابق نتایج این مقاله برای شبیه سازی نمای دو پوسته جعبه ای با تهویه طبیعی با مقیاس ۳۳٪ مدل سه بعدی واقعی، دقت نتایج شبیه سازی تغییر محسوسی ندارد ولی زمان محاسبات یک سوم می‌شود.

- برای کاهش زمان محاسبات، می‌توان ابعاد بهینه مش را به گونه ای تعیین کرد که دقت محاسبات حفظ شده و زمان محاسبات به حداقل ممکن برسد. اندازه مش ۷ میلیمتر نسبت به ۸ میلیمتر، زمان محاسبات کامپیوتری را حدود ۴۰٪ افزایش می‌دهد ولی در دقت نتایج حاصل شده تاثیری ندارد، لذا در راستای کاهش زمان محاسبات کامپیوتری و با حفظ دقت نتایج حاصل از شبیه سازی و در نظر گرفتن استقلال نتایج از ابعاد شبکه، اندازه مش ۸ میلیمتری برای مدلسازی نمای دو پوسته جعبه ای در نرم افزار فلونت مناسب است.

## ۶- مراجع

- [1] Ahmar, S. El., Battista, F., Fioravanti, A., Simulation of the thermal performance of a geometrically complex Double-Skin Facade for hot climates: EnergyPlus vs OpenFOAM, *Building Simulation*, Vol. 12, No. 5, pp. 781–795, (2019).
- [2] Pasut, W., Di Carli, M., Evaluation of various CFD modelling strategies in predicting airflow and temperature in a naturally ventilated double skin façade, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 37, pp. 267–274, (2012).
- [3] Jankovic, A., Goia, F., Impact of double skin facade constructional features on heat transfer and fluid dynamic behavior. *Building and Environment*. Vol. 196, (2021).
- [4] L. Mei, D.L., Loveday, D.G., Infield, V., Hanby, M., Cook, Y., Li, M., Holmes, J., Bates, The influence of blinds on temperatures and air flows within ventilated double-skin façades. *Proceedings of clima 2007 Well-Being Indoors*, (2007).
- [5] Aldawoud, A., Salameh, T., Kim, Y. K., (2020): Double skin façade: energy performance in the

- condition, *Building Services Engineering Research and Technology*, (2020).
- [23] Wang, H., John, Z., Zhai, Advances in building simulation and computational techniques: a review between 1987 and 2014, *Energy and Building*, Vol. 128, pp. 319–335, (2016).
- [24] Amaireh, I., Numerical investigation into a double skin façade system integrated with shading devices, with reference to the city of Amman, PhD thesis, University of Nottingham, (2017).
- [25] Hassanli, S., Kwok, K.C.S., Zhao, M., Performance assessment of a special Double Skin Façade system for wind energy harvesting and a case study, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 175, pp. 292–304, (2018).
- [26] Li, Y., Darkwa, J., Kokogiannakis, G., Su, W., Phase change material blind system for double skin façade integration: system development and thermal performance evaluation, *Applied Energy*, Vol. 252, (2019).
- [27] Tao, Y., Zhang, H., Zhang, L., Zhang, G., Tu, J., Shi, L., Ventilation performance of a naturally ventilated double-skin façade in buildings, *Renewable Energy*, 2020.
- [28] Iyi, D., Hasan, R., Penlington, R., Underwood, C., Double Skin Façade: Modelling Technique and Influence of Venetian Blinds on the Airflow and Heat Transfer, *Applied Thermal Engineering*, (2014).
- [16] Hassanli, S., Kwok, K.C.S., Zhao, M., Performance assessment of a special Double Skin Façade system for wind energy harvesting and a case study, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 175, pp. 292–304, (2018).
- [17] Hong, X., Leung, M.K.H., He, W., Effective use of Venetian blind in Trombe wall for solar space conditioning control, *Applied Energy*, Vol. 250, pp. 452–460, (2019).
- [18] Al-Yasiri, Q., Szabó, M., Arıcı, M., A review on solar-powered cooling and air-conditioning systems for building applications, *Energy Reports*, Vol. 8, pp. 2888-2907, (2022).
- [19] Hou, K., Li, S., Wang, H., Simulation and experimental verification of energy saving effect of passive preheating natural ventilation double skin façade, *Energy Exploration & Exploitation*, (2020).
- [20] Inan, T., Basaran, T., Ezan, M.A., Experimental and numerical investigation of natural convection in a double skin facade, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 106, pp. 1225–1235, (2016).
- [21] Inan, T., Basaran, Erek, A., Experimental and numerical investigation of forced convection in a double skin façade, *Energies*, Vol.10 No. 9, (2017).
- [22] Kim, D.D., Computational fluid dynamics assessment for the thermal performance of double-skin façades in office buildings under hot climatic